



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



RISCOS DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO E TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO

OURO PRETO - MG

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO
ANDRÉ BUTTROS RODRIGUES

Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto, como exigência para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Professor orientador: Hernani Mota de Lima

R696r

Rodrigues, André Bruttos.

Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição [manuscrito] / André Bruttos Rodrigues. - 2017.

39f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração. 2. Beneficiamento de minério. 3. Rejeitos. 4. Geotecnia. I. de Lima, Hernani Mota. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.136

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 29 dias do mês de março de 2017, às 16:00h, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“RISCOS DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO E TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO”**, pelo aluno **André Buttros Rodrigues**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador)**, **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda** e **Engº de Minas Francisco de Paula Vitor Fonseca de Abreu**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* do candidato, com a nota *7,5* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

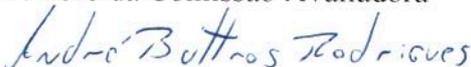
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

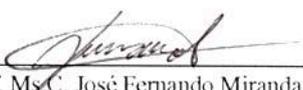
Ouro Preto, 29 de março de 2017.


Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Francisco de Paula Vitor Fonseca de Abreu
Membro da Comissão Avaliadora


André Buttros Rodrigues


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedicada aos meus pais, Sílvia e Aloísio, pela educação e formação de caráter e, à República Pif-Paf, moradores e Ex-alunos por serem minha segunda família.

Os meus sinceros agradecimentos às famílias Buttros e Rodrigues, ao Prof. Doutor Hernani Mota de Lima e demais professores do DEMIN, à República Pif-Paf, ao CAEM, à UFOP e a todos os outros amigos que Ouro Preto me deu.

SUMÁRIO

Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e Justificativa do Tema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura do Trabalho.....	3
Capítulo 2 REJEITO E ESTÉRIL	4
Capítulo 3 RUPTURA DE BARRAGEM.....	6
Capítulo 4 A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E SEUS MÉTODOS.....	8
4.1 Aterro Hidráulico	10
4.1.1 Alçamento a montante	11
4.1.2 Alçamento a Jusante.....	13
4.1.3 Alçamento por Linha de Centro.....	14
4.2 Disposição Conjunta – Codisposição e Disposição Compartilhada	15
4.3 Disposição em Cava Subterrânea	17
4.4 Disposição em Cava a Céu Aberto.....	18
4.5 Disposição de Rejeito Espessado.....	19
4.6 Disposição de Rejeito Filtrado	23
Capítulo 5 CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 FLUXOGRAMA TÍPICO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO.....	5
FIGURA 2 GRÁFICO DA PRODUÇÃO DE COBRE E DE MINÉRIO E TEOR DE MINÉRIO.....	6
FIGURA 3 GRÁFICO COMPARANDO CAUSAS DE RUPTURA COM OS TIPOS DE BARRAGEM.	7
FIGURA 4 EVOLUÇÃO DAS ATIVIDADES DAS BARRAGENS EM RELAÇÃO AO TEMPO.....	9
FIGURA 5 TIPOS DE ALTEAMENTO PARA ATERRO HIDRÁULICO	10
FIGURA 6 DISPOSIÇÃO EM CAVA A CÉU ABERTO	18
FIGURA 7 SEÇÃO VERTICAL DE UM ESPESSADOR CONVENCIONAL	20
FIGURA 8 CONSISTÊNCIA DA PASTA MINERAL	20
FIGURA 9 CROQUIS QUALITATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE POLPAS E PASTA	21
FIGURA 10 CICLO DE FILTRAGEM DE UM FILTRO DE DISCO CONVENCIONAL.....	24
FIGURA 11 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FILTRADO EM MANTOS BLANCOS.	24

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS POR ATERRO HIDRÁULICO.....	11
TABELA 2 VANTAGENS DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO CONJUNTA	16
TABELA 3 DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO CONJUNTA	16

RESUMO

Em conjunto à atividade de mineração, tem-se a disposição de rejeitos, algo que se tornou um problema para mineradoras de todas as dimensões, tendo em vista, os potenciais danos socioambientais e econômicos causados por uma falha na gestão desses resíduos. Com o passar do tempo, os minérios se tornam mais profundos e mais pobres em relação ao teor, o que causa um aumento cada vez maior na produção de estéréis e rejeitos. Dentro desse contexto, a demanda por alternativas eficazes e viáveis para a disposição de rejeitos tem ficado cada vez maior e, esse trabalho, por meio de uma revisão da bibliografia, tem o objetivo de apresentar os riscos ligados com a disposição de rejeitos, listar e avaliar sistemas alternativos de disposição, comparando-os, considerando suas vantagens e desvantagens de modo a auxiliar na escolha do melhor método para cada situação em particular. Os métodos abordados nesse trabalho são os de aterro hidráulico, disposição compartilhada e co-disposição, disposição em aberturas subterrâneas e a céu aberto e disposição de rejeito espessado e filtrado.

Palavras-Chave: Mineração; Rejeitos; Sistemas de Disposição de rejeitos.

ABSTRACT

In addition to the mining activity, there is the disposal of tailings, which has become a problem for mining companies of all sizes, considering the potential socio-environmental and economic damages caused by a failure to manage these wastes. Over time, the ore become deeper and with lower grades, which causes an increasing growth in the production of waste rock and tailings. Within this context, a search for effective and viable alternatives for tailings disposal has been increasing and, this work, through bibliographical revisions, aims to present the risks related to this activity and to list some alternatives to the same, comparing them, considering their advantages and disadvantages and understanding which method should be used for certain situations. The methods cited in this work are hydraulic landfill, shared disposal and codisposal, underground and open pit disposal, and thickened and filtered tailings disposal.

Key Words: Mining, Tailings, Storage Tailings Methods.

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Justificativa do Tema

De acordo com Araújo (2006), inerente à atividade de mineração, está a geração de significativa quantidade de rejeitos. Desta forma, as mineradoras necessitam, em seu planejamento de longo prazo, incorporar em seu plano diretor alternativas de disposição de rejeitos de forma mais segura e econômica. Barragens de rejeito, por sua vez, são estruturas geotécnicas que devem permanecer estáveis por períodos de tempo muito longos, normalmente maiores que a própria vida útil da mina.

Dentre os resíduos produzidos pela mineração, tem-se os estéreis e os rejeitos. Esses resíduos são os grandes responsáveis pelos impactos ambientais causados pela mineração, portanto, deve-se ter uma atenção especial para o tratamento e armazenamento desse material, visando minimizar os custos e maximizar a segurança das barragens. Recentemente, o Brasil protagonizou o maior desastre ambiental de sua história. O rompimento da barragem de Fundão da Samarco Mineração S.A. localizada no Distrito de Bento Rodrigues ocorrido em 5 de novembro de 2015 no estado de Minas Gerais deixou o mundo inteiro atento aos perigos do uso inadequado dessas estruturas. De acordo com Silva (2007):

“A mineração, evidentemente, causa um impacto ambiental considerável. Ela altera intensamente a área minerada e as áreas vizinhas, onde são feitos os depósitos de estéril e de rejeito. Além do mais, quando temos a presença de substâncias químicas nocivas na fase de beneficiamento do minério, isto pode significar um problema sério do ponto de vista ambiental. ”
(SILVA, 2007)

Segundo Figueiredo (2007), os rejeitos podem ser descartados em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes sub-aquáticos, essa última com algumas restrições ambientais. A forma como esses rejeitos serão dispostos está diretamente relacionada ao tipo de minério e de processo empregados no beneficiamento.

Com o passar do tempo, tem-se a necessidade de lavrar minérios cada vez mais pobres ou mais profundos, gerando assim uma produção de rejeito e material estéril maior. O aumento no volume de rejeito faz com que as barragens de rejeito convencionais ganhem grandes dimensões, tornando-se um risco considerável a todo ecossistema a jusante.

Diante dos fatos previamente apresentados, esse trabalho se justifica pela necessidade de maiores estudos em relação à disposição dos rejeitos, para assim, minimizar-se os riscos relacionados a essa importante etapa da atividade mineira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é mostrar os riscos associados às barragens de rejeitos e apresentar os métodos alternativos de disposição de rejeitos assim como suas vantagens e desvantagens e, a partir disso, avaliar qual método deve ser usado em situações específicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os métodos levando em conta fatores sociais, ambientais e econômicos.
- Estabelecer qual método seria ideal para determinadas situações.

1.3 Metodologia

Neste trabalho será apresentada a revisão de literatura, compreendendo aspectos gerais sobre rejeito, estéril e a disposição desses resíduos, os riscos associados, bem como um estudo mais aprofundado em cada uma das diferentes técnicas de disposição, abordando suas vantagens e desvantagens, concluindo assim quais as situações favoráveis para o uso de cada técnica.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho é constituído por 5 capítulos, sendo esses:

- Capítulo 1: Introdução
- Capítulo 2: Rejeito e estéril
- Capítulo 3: Ruptura de barragem
- Capítulo 4: A disposição de rejeitos e seus métodos
- Capítulo 5: Conclusão

Capítulo 2 REJEITO E ESTÉRIL

De acordo com Viana *et al.* (2012), tem-se na atividade mineira, a extração e a movimentação de grandes volumes de materiais e, a quantidade de resíduos gerados depende dos processos utilizados nas etapas de lavra e concentração do minério.

“Na atividade de mineração, existem dois tipos principais de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais. Estes processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final. Existem ainda outros resíduos, constituídos por um conjunto bastante diverso de materiais, tais como efluentes do tratamento de esgoto gerado nas plantas de mineração, carcaças de baterias e pneus utilizados pela frota de veículos, provenientes da operação das plantas de extração e de beneficiamento das substâncias minerais.” (VIANA *et al.*, 2012)

Os processos de beneficiamento citados são descritos no fluxograma ilustrado na Figura 1.

Os rejeitos da mineração podem ser liberados com diferentes níveis de saturação dependendo dos processos utilizados no beneficiamento do mineral. Segundo Araújo (2006), dependendo do tipo de minério e do processo utilizado, os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos até solos de granulometria fina e alta plasticidade.

Com o passar do tempo, os minérios a serem lavrados estão ficando cada vez mais pobres ou menos acessíveis, o que causa uma produção de rejeito cada vez maior, o que implica na necessidade do desenvolvimento de métodos para mitigar os problemas relacionados a esses resíduos.

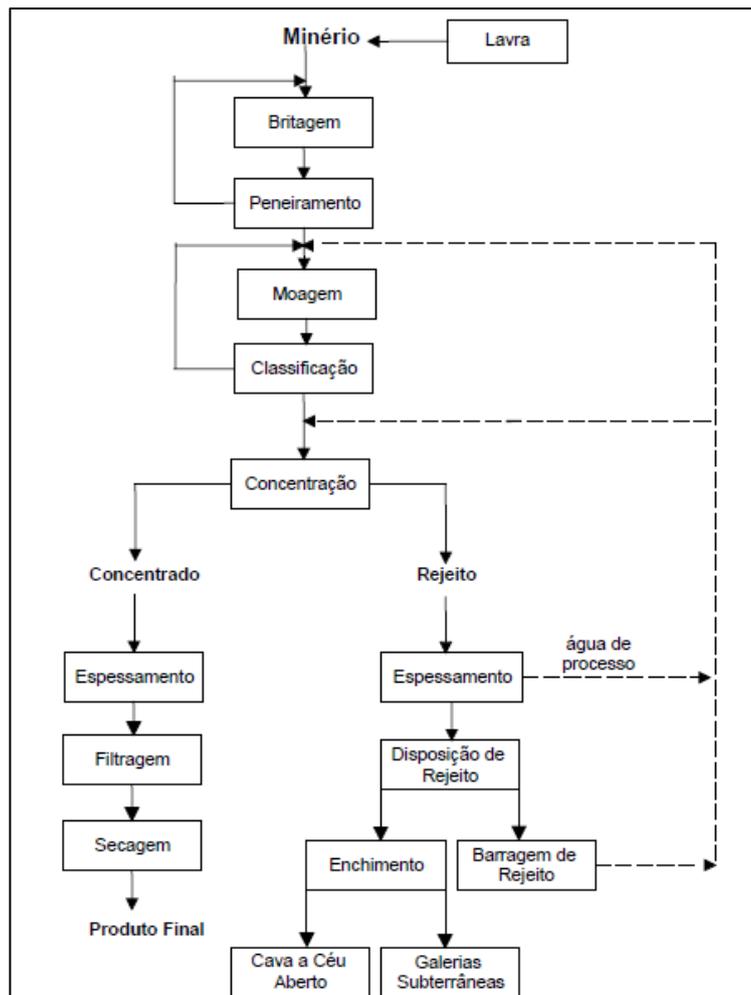


Figura 1 Fluxograma típico de tratamento de minério. (Luz & Lins, 2004)

De acordo com Portes (2013), dentre os diversos métodos de disposição de rejeitos tem-se verificado uma preferência das mineradoras brasileiras pela disposição em superfície na forma de polpa, com utilização de barragens de contenção de rejeitos. Entretanto, os rejeitos podem se apresentar sob diferentes estados físicos, ou seja, polpa, pasta, espessado ou torta (rejeito filtrado), implicando em comportamentos geotécnicos específicos. Não foi estabelecido o teor de sólidos da fronteira para cada consistência do rejeito em função desse valor ser uma característica do próprio rejeito e do processo de eliminação da água.

Capítulo 3 RUPTURA DE BARRAGEM

Chambers & Higman (2011) afirmam que as barragens de rejeito estão entre as maiores estruturas de barragens do mundo, devendo assim permanecer estáveis. A ruptura de uma grande barragem pode acarretar danos ambientais de longo prazo com altos custos de reparo.

De acordo com Bowker & Chambers (2015), ao interpretar a frequência de acidentes com barragens entre 1910-2010, conclui-se que o número de incidentes tem diminuído nas últimas duas décadas evidenciando o sucesso da legislação e fiscalização, bem como da adoção das melhores práticas da indústria. Porém, ao se estudar mais a fundo, percebe-se que a incidência de casos de alta gravidade tem sido maior. Segundo o autor, o aumento da gravidade dos acidentes com barragens se deve à diminuição dos teores dos minérios encontrados e à contínua queda do preço de grande parte dos metais. Com o avanço da tecnologia empregada aos métodos de concentração, a lavra de minérios com teor mais baixo se torna economicamente possível, porém, ao mesmo tempo, gerir o aumento no volume de rejeito gerado se torna um desafio. O aumento na quantidade de rejeito com o tempo pode ser interpretado na figura 2, haja visto que a produção de minério aumenta para a obtenção de uma quantidade constante de cobre metálico.

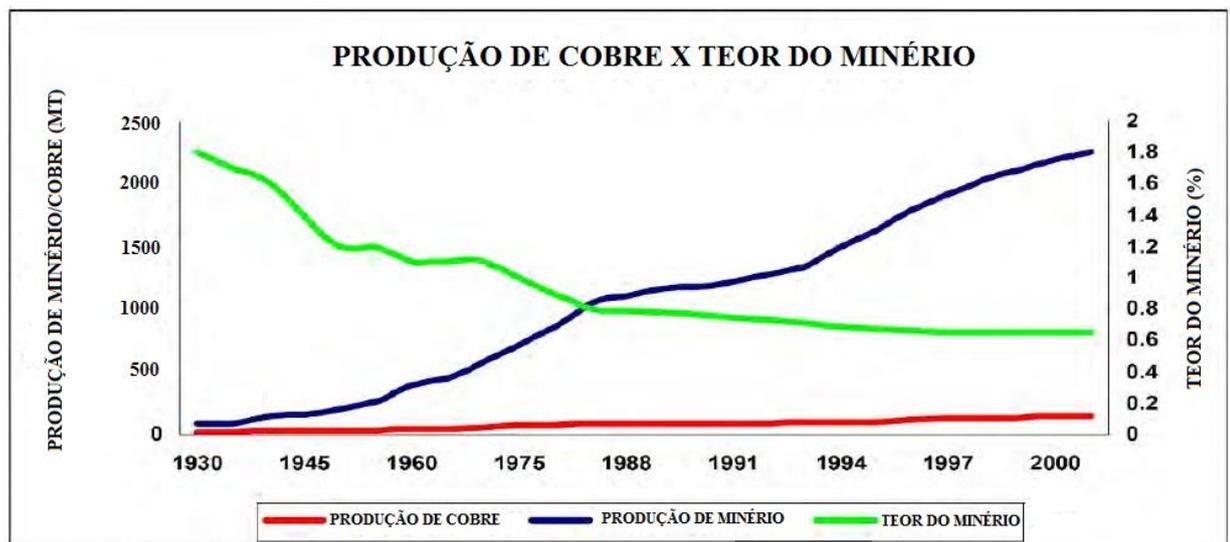


Figura 2 Gráfico da produção de cobre e de minério e teor de minério. (Raw Materials Group, Stockholm apud Bowker & Chambers,2015)

Segundo Chambers & Higman (2011), os motivos que podem levar a ruptura de uma barragem incluem dano acumulado (erosão interna ou múltiplos eventos sísmicos), acidentes geológicos (deslizamento de terra), liquefação do material de alçamento ou mudança nos padrões climáticos. A figura 3 apresenta um gráfico comparando número de incidentes por tipo de barragem com diferentes causas e, de acordo com esse, as 3 maiores causas são o alçamento em excesso, a estabilidade de taludes e os eventos sísmicos.

Chambers & Higman (2011) afirmam que para não haver problemas com excesso de alçamentos ou atividades sísmicas, a barragem deve ser projetada para resistir ao maior evento sísmico ou hidrológico possível em sua localização. Uma alta qualidade em dados e métodos de predição, além da adoção de uma linha conservativa para prever as piores condições possíveis são necessários para remediar esses tipos de problemas. No caso dos dados, esses deveriam ser levantados em escalas milenares, porém o que se tem nos dias de hoje são levantamentos feitos a partir das últimas décadas. Incidentes relacionados às categorias de estabilidade de talude, fundação e estrutural podem ser relacionados ao projeto de engenharia e a falhas de construção, ou seja, melhores projetos e práticas de construção ligados ao uso de maiores margens de segurança são necessários para diminuir a frequência desses incidentes.

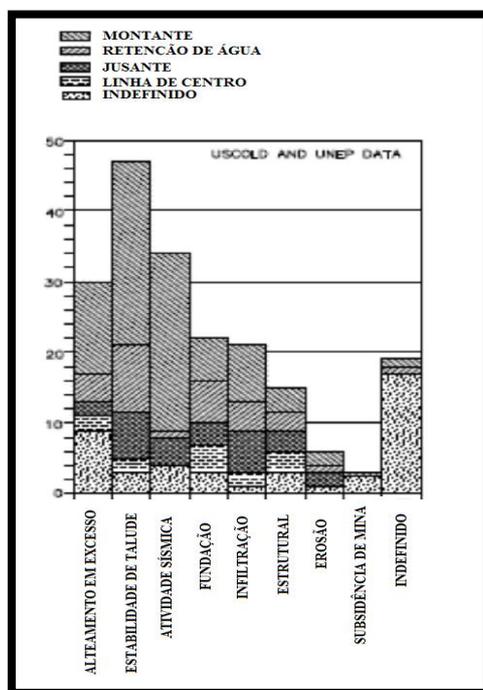


Figura 3 Gráfico comparando número de incidentes em diferentes tipos de barragem com causas de ruptura. (Chambers & Higman, 2011 modificado)

Capítulo 4 A DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E SEUS MÉTODOS

De acordo com Lozano (2006), barragens de rejeito são as estruturas responsáveis por reter os resíduos sólidos e a água provenientes dos processos de beneficiamento mineral. Seu planejamento tem início com a procura de um lugar para sua implementação, etapa que conta com parâmetros geológicos, hidrológicos, topográficos, geotécnicos, ambientais, sociais, entre outros.

“As etapas da vida útil de uma barragem de rejeitos compreendem a procura do local, o projeto de instalação, a construção, a operação e o fechamento definitivo (Figura 4). O processo de seleção de locais aptos divide-se em duas fases claramente diferenciadas. Na primeira fase realiza-se uma avaliação em grande escala, que tem como objetivo descartar áreas impróprias e obter uma classificação preliminar de zonas aceitáveis, baseada em fatores gerais. Podem-se utilizar avaliadores geológicos de prospecção como a geoquímica ou a geofísica, para identificar áreas potencialmente exploráveis para extração de minério. Áreas com aspectos legais impeditivos também são eliminadas nesta fase, como por exemplo, áreas de proteção ambiental e de patrimônio histórico. Na segunda fase, uma vez delimitadas regiões alternativas menores, utilizam-se fatores mais específicos de escolha.” (LOZANO, 2006)

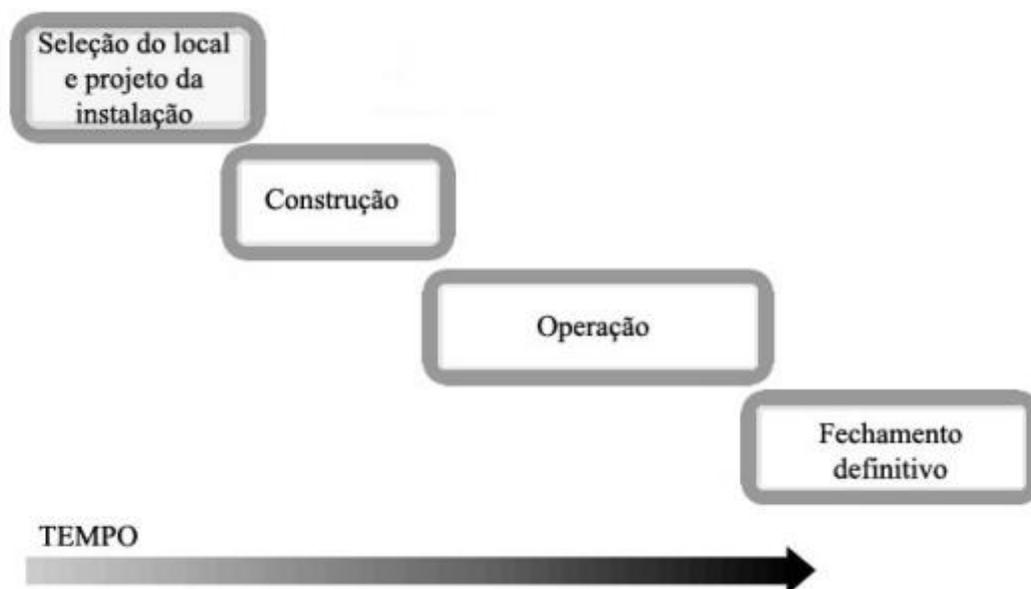


Figura 4 Evolução das atividades das barragens em relação ao tempo. (La Asociación Minera de Canadá, 1998 apud Lozano, 2006).

Um grande problema da disposição de rejeitos, assim como em quase todas as atividades contemporâneas, é que muitas vezes, a tentativa de minimizar os gastos e maximizar o lucro faz com que as opções mais baratas sejam mais utilizadas. Segundo Davies & Martin (2000), o grande volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que seja atrativa a utilização destes materiais como material de construção das próprias barragens de contenção, desde que sejam obedecidas algumas premissas, tais como: separação da fração grossa e fina (as propriedades geotécnicas são diferentes entre as frações), controle dos processos de separação (granulometria), utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência), proteção superficial da barragem, dentre outras.

Segundo Portes (2013), no Brasil, a disposição de rejeitos em forma de polpa ainda é a técnica mais usada e requer grandes estruturas de terra (barragens) para sua disposição. Este tipo de disposição, como é sabido, acarreta grande impacto ao meio ambiente devido as grandes áreas ocupadas pela bacia de rejeitos e possui grandes riscos associados.

4.1 Aterro Hidráulico

“Esta barragem pode ser constituída de areia ou de rejeitos de mineração. O diferencial desse tipo de barragem é que o material do aterro é transportado por meio de tubulações com água (transporte com cerca de 85% de água). Após o lançamento do aterro ocorre a segregação do material. As partículas mais grossas se depositam perto do ponto de descarga e as partículas mais finas ficam mais distantes desse ponto.” (SOUZA,2013)

Neste método de disposição, tem-se a possibilidade de fazer o alteamento da barragem em várias etapas de acordo com a necessidade, podendo esses serem feitos de três diferentes maneiras, nomeadas de acordo com a direção do desenvolvimento dos alteamentos em relação ao dique inicial, como é ilustrado na Figura 5.

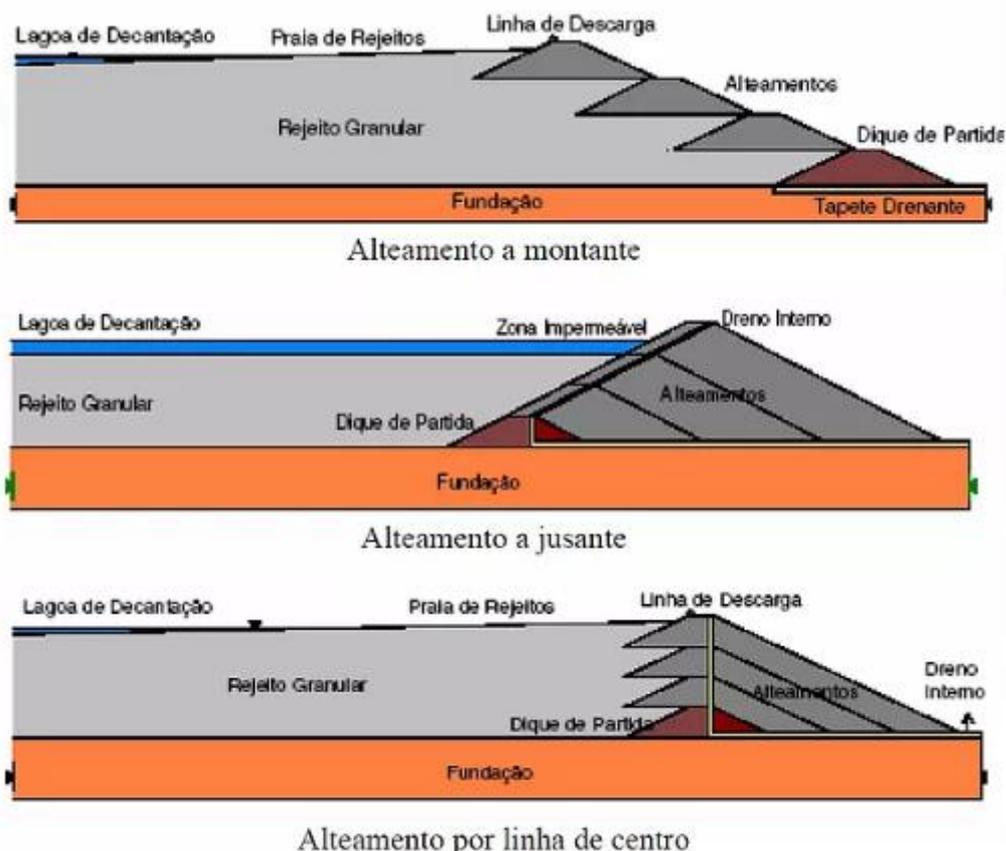


Figura 5 Tipos de alteamento para aterro hidráulico (MPGEO, 2016).

Segue a tabela 1, onde são comparadas algumas características desses métodos:

Tabela 1 Comparativo das características dos métodos por aterro hidráulico.

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito recomendado	<ul style="list-style-type: none"> •Mais de 40% de areia •Baixa densidade de polpa para promover segregação 	<ul style="list-style-type: none"> •Qualquer tipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Areias ou lamas de baixa plasticidade
Requerimentos de descarga dos rejeitos	<ul style="list-style-type: none"> •Descarga periférica, e bom controle de água livre acumulada 	<ul style="list-style-type: none"> •De acordo com o projeto 	<ul style="list-style-type: none"> •Descarga periférica, conservando o eixo da barragem
Armazenamento d'água	<ul style="list-style-type: none"> •Não recomendado para grandes volumes 	<ul style="list-style-type: none"> •Boa 	<ul style="list-style-type: none"> •Não recomendado para armazenamento permanente
Resistência sísmica	<ul style="list-style-type: none"> •Fraca em áreas de alta sismicidade 	<ul style="list-style-type: none"> •Boa 	<ul style="list-style-type: none"> •Aceitável
Restrições de alteamento	<ul style="list-style-type: none"> •Recomendável menos de 5 a 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano 	<ul style="list-style-type: none"> •Nenhuma 	<ul style="list-style-type: none"> •Pouca
Requisitos de alteamento	<ul style="list-style-type: none"> •Solo natural •Rejeitos ou estéril 	<ul style="list-style-type: none"> •Rejeitos ou estéril 	<ul style="list-style-type: none"> •Rejeitos ou estéril
Custo relativo do corpo do aterro	<ul style="list-style-type: none"> •Baixo V_m 	<ul style="list-style-type: none"> •Alto (3 V_m) 	<ul style="list-style-type: none"> •Moderado (2 V_m)

Fonte: Vick, 1983 apud Lozano, 2006 modificado

4.1.1 Alteamento a montante

Segundo Lozano (2006), inicialmente é construído um dique de partida e nos alteamentos o eixo se desloca para montante. A polpa é descarregada ao longo do perímetro da crista do dique, formando uma praia. A descarga pode ser feita com ciclones, ou com uma sequência de tubulações menores perpendiculares a tubulação principal, chamados “spigots”, que permitem uma melhor uniformidade na formação da praia. Como se tem uma ampla distribuição granulométrica das partículas sólidas, as partículas mais grossas e mais pesadas sedimentam mais rápido, ficando mais próximas ao dique, enquanto as menores e menos densas ficam em suspensão e são transportadas para as zonas internas da bacia.

Chambers & Higman (2011) afirma que esse é o método menos seguro em porque as estruturas de alteamento repousam sobre o próprio rejeito e, quando esse chega da usina de beneficiamento, pode permanecer saturado por longos períodos. Quando o rejeito está saturado, se torna muito susceptível à liquefação quando submetido à presença de atividades sísmicas.

De acordo com Lozano (2006), nas etapas posteriores são construídos diques em todos o perímetro da bacia e o tamanho desses varia dependendo das necessidades operacionais da mina. O dique inicial sempre é maior que os diques de alteamento.

Seguem as vantagens e desvantagens desse método:

Vantagens:

- Volume de material usado no alteamento é menor.
- Menor custo de construção.
- Maior velocidade de alteamento.
- Facilidade de operação.
- Pode ser construída em topografias muito íngremes, onde o limitante principal é a área para disposição.

Desvantagens:

- Baixa segurança.
- Susceptibilidade à liquefação por sismos naturais ou por vibrações decorrentes de ação humana, isso devido à fundação dos alteamentos ser constituída de areais saturadas fofas não compactadas.
- Quando os rejeitos não são compactados adequadamente, a superfície crítica de deslizamento passa pelos rejeitos sedimentados.
- Existe a possibilidade de “*piping*” devido à linha freática estar muito próxima do talude da jusante e à não compactação dos rejeitos, ou quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados.
- Dificuldade de implementação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível de água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura.

4.1.2 Alteamento a Jusante

Segundo Lozano (2006), esse método é chamado assim por que o eixo da barragem se desloca a jusante. É construído um dique inicial impermeável, o qual deve ter uma drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante.

“Neste método os rejeitos são ciclonados e o “*underflow*” é lançado no talude da jusante. Somente são utilizados os rejeitos grossos no alteamento, os quais são compactados quando as características de umidade da zona o permitam; também se pode utilizar material de empréstimo, ou estéril proveniente da lavra.”
(LOZANO, 2006)

Seguem as vantagens e desvantagens desse método:

Vantagens:

- O método é eficiente para o controle das superfícies freáticas, pela construção de sistemas contínuos de drenagem.
- Pode ser usado em lugares com vibrações e/ou alta sismicidade, já que, se compactados os rejeitos do “*underflow*”, a susceptibilidade de liquefação é muito menor.
- Operação relativamente simples.
- Possibilita a compactação de todo o corpo da barragem.
- Maior segurança devido aos alteamentos controlados (disposição da fração grossa dos rejeitos a jusante, sistemas de drenagem e compactação): as probabilidades de “*piping*” e de rupturas horizontais são muito menores.
- O estéril proveniente da lavra pode ser utilizado, e/ou misturado nos alteamentos.

Desvantagens:

- Necessidade de grandes quantidades de rejeitos nas primeiras etapas da construção.

- Dependendo das características dos rejeitos, os problemas de área se incrementariam, devido aos taludes bastante abatidos.
- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes, havendo probabilidade de sedimentação dos finos.
- Devido à complexidade dos diques de partida e de enrocamento e aos sistemas de drenagem, os investimentos iniciais são altos.
- Em zonas de alta pluviosidade é possível que os rejeitos a jusante não possam ser compactados adequadamente, devendo-se esperar épocas de estiagem para a operação em cima dos rejeitos.
- Não possibilita a proteção com cobertura vegetal do talude de jusante, e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos.

É necessário o emprego de ciclones para garantir uma ótima separação dos rejeitos.

4.1.3 Alteamento por Linha de Centro

De acordo com Chambers & Higman (2011), esse método é uma alternativa híbrida da elevação a jusante. É um meio termo entre os dois métodos citados anteriormente em relação à estabilidade sísmica.

Segundo Lozano (2006), inicialmente é construído um dique de partida e o rejeito é lançado perifericamente da crista do dique até formar uma praia. O alteamento subsequente é formado lançando materiais de empréstimo, estéril da mina ou “*underflow*” de ciclones, sobre o limite da praia anterior e no talude de jusante do maciço de partida, mantendo o eixo coincidente com o eixo do dique de partida. Esse método é uma tentativa de mesclar as vantagens dos alteamentos a jusante e a montante tentando minimizar suas desvantagens.

Seguem as vantagens e desvantagens desse método:

Vantagens:

- Facilidade na construção.

- Eixo dos alteamentos constante.
- Redução do volume de “*underflow*” necessário em relação ao método a jusante.

Desvantagens:

- Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante (se o material do rejeito fica saturado a jusante, pode comprometer a estabilidade do maciço).
- Operação complexa; é necessário equipamento para disposição mecânica a jusante.
- Pela complexidade da operação, os investimentos globais podem ser altos.

4.2 Disposição Conjunta – Codisposição e Disposição Compartilhada

De acordo com Peixoto (2012) apud Silva (2014), com a crescente dificuldade de liberação, por parte dos órgãos ambientais, de novas áreas para a disposição final dos resíduos de mineração, uma alternativa bastante viável seria integrar estes sistemas de disposição em um mesmo depósito através da disposição de rejeitos e estéreis num mesmo espaço físico. Quando a mistura rejeito-rejeito ou rejeito-estéril for realizada previamente ou efetivada no próprio ambiente da disposição tem-se a técnica definida por codisposição. Agora, quando os materiais estéreis e os rejeitos forem dispostos no mesmo espaço físico, sem, contudo, precisar misturá-los tem-se a técnica definida por disposição compartilhada.

As tabelas 2 e 3 apresentam algumas vantagens e desvantagens dos métodos de disposição conjunta.

Tabela 2 Vantagens e desvantagens do método de Co-disposição.

Método	Co-disposição
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Redução de volume - melhoria das características geotécnicas e de densidade da mistura de rejeitos; ▪ Redução de volume - melhoria das características geotécnicas e de densidade da mistura de rejeitos + estéreis; ▪ Melhoria das características de resistência e de deformabilidade quando os resíduos misturados possuem granulometrias muito diferentes; ▪ Redução de comprometimento ambiental de áreas para disposição de resíduos; ▪ Recuperação de área minerada.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necessidade de maiores cuidados no projeto e de controle durante a operação do sistema; ▪ Possibilidade de comprometimento das características de resistência e de deformabilidade quando resíduos muito finos são misturados a resíduos grossos em grandes proporções; ▪ Comprometimento ambiental quando um dos rejeitos for quimicamente ativo ou tóxico;

Fonte: Silva, 2014 (modificado)

Tabela 3 Vantagens e desvantagens do método de Disposição Compartilhada.

Método	Disposição Compartilhada
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aproveitamento de áreas já utilizadas anteriormente para disposição de rejeitos ou de estéreis (estéreis lançados sobre bacias exauridas de rejeito ou rejeitos lançados sobre platôs de pilhas de estéreis); ▪ Redução de comprometimento ambiental de áreas para disposição de resíduos; ▪ Recuperação de área minerada.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necessidade de maiores cuidados no projeto e de controle durante a operação do sistema; ▪ Comprometimento ambiental quando um dos resíduos for quimicamente ativo ou tóxico.

Fonte: Silva, 2014 (modificado)

4.3 Disposição em Cava Subterrânea

“A deposição subterrânea pode ter certos méritos em casos especiais, nos quais os rejeitos podem ser considerados inertes e sem perigos potenciais. No entanto, muitos rejeitos com o tempo podem gerar poluentes (por exemplo, a percolação d’água através dos rejeitos pode dissolver vários poluentes metálicos, pode ocorrer oxidação do enxofre e produção de ácidos, por redução do pH) e, portanto, contaminar águas subterrâneas. Os rejeitos podem ser bombeados diretamente na cava da mina, ou pode-se retirar água dos mesmos para melhorar suas características de deposição; isto depende dos métodos de extração do minério.” (LOZANO, 2006)

Figueiredo (2007) afirma que a disposição de rejeito em abertura subterrânea, seja na forma de polpa, pasta ou até mesmo material consolidado, geralmente é feita concomitantemente com o método de lavra chamado de corte e enchimento, onde o material preenche os realces gerados pela exploração do minério. Nesse caso, são praticadas duas técnicas de preenchimento de minas subterrâneas, escolhidas em função da demanda da operação. A primeira corresponde à necessidade de preenchimento para formar um novo piso, a ser utilizado para desmontar a fatia de minério imediatamente acima da área lavrada. Neste caso, o preenchimento ocorre obrigatoriamente junto com a lavra do minério e pode ser feito com a utilização dos rejeitos misturados com estéril e areias (*backfill* ou *pastefill*). A segunda técnica se aplica quando o preenchimento da câmara ou realce é necessário para garantir a manutenção permanente da estabilidade do maciço rochoso. Neste caso o preenchimento pode se dar durante o processo de lavra ou durante o fechamento da mina, podendo ser realizado com argamassa constituída de rejeito (*pastefill*) e/ou estéril, areia e cimento, para se obter melhores propriedades geotécnicas para a mistura.

Segundo Lozano (2006), os principais motivos para o uso desse método são:

- Proporcionar um piso de trabalho para as atividades de extração de minério.
- Proporcionar suportes para as paredes de escavações subterrâneas.
- Maximizar a recuperação do corpo de minério.

4.4 Disposição em Cava a Céu Aberto

Segundo Portes (2013), a disposição em cava a céu aberto também conhecida como “disposição em pit”, consiste em se dispor rejeito em minas exauridas ou naquelas em que ainda há extração de minério.

A figura 6 ilustra um exemplo desse método.



Figura 6 Disposição em cava a céu aberto (Lozano, 2006).

De acordo com Portes (2013), as vantagens e desvantagens deste método são:

Vantagens:

- A facilidade de recuperação das áreas lavradas concomitante ao avanço da lavra.
- Redução de impactos ambientais e visuais.
- Redução de riscos.
- Minimização de custos operacionais.

Desvantagens:

- Logística de extração de minério devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava.
- Pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção (elevado desnível da cava).
- Problemas de percolação e estabilidade.

4.5 Disposição de Rejeito Espessado

Segundo Portes (2013), o conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky em 1968 e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e consequente aumento do teor de sólidos. Neste processo são utilizados os espessadores que possuem a função de separar os sólidos do líquido via sedimentação de partículas por gravidade e com a ajuda de reagentes. O desaguamento é, portanto, um processo mecânico.

De acordo com De Lara (2011), o espessamento é realizado com as seguintes finalidades: obtenção de polpas de concentrados adequadas a uma determinada operação subsequente, visando transporte e descarte mais eficazes e recuperação de água para reciclo industrial e recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.

Segundo Portes (2013), o funcionamento de um espessador convencional consiste na alimentação da polpa, seguida pela sedimentação das partículas. Na parte superior do tanque a água clarificada (*overflow*) transborda, enquanto que as partículas sedimentadas

(*underflow*) são direcionadas por pás até o cone de descarga. Uma seção típica de um espessador pode ser vista na figura 7.

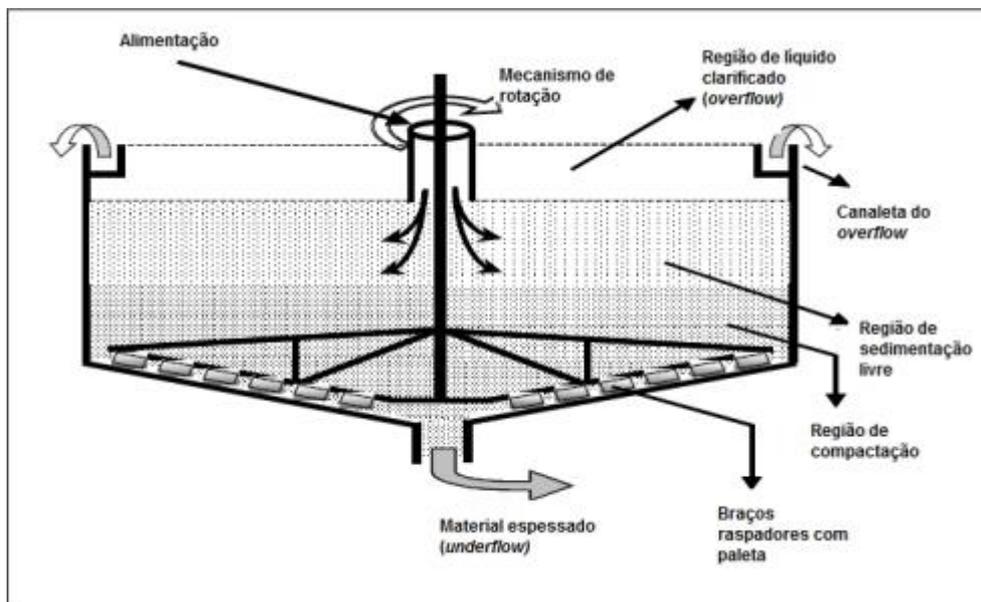


Figura 7 Seção vertical de um espessador convencional (França, 2007).

O produto do espessamento é uma mistura com teor de sólidos maior que o da polpa, chamado pasta mineral. De acordo com De Lara (2011), a conformação e consistência da pasta, durante sua disposição, podem ser avaliadas por meio de técnicas tais como o teste de abatimento (*slump*) e teste de calha (*flume*). A consistência dessa pode ser vista na figura 8.



Figura 8 Consistência da pasta mineral (Osório et al., 2008 apud De Lara, 2011).

A consistência desse material é importantíssima em relação a sua disposição, pois a partir do momento em que se aumenta o teor de sólidos é possível obter ângulos de

disposição maiores e, conseqüentemente, maior volume disposto, como pode ser observado na figura 9.

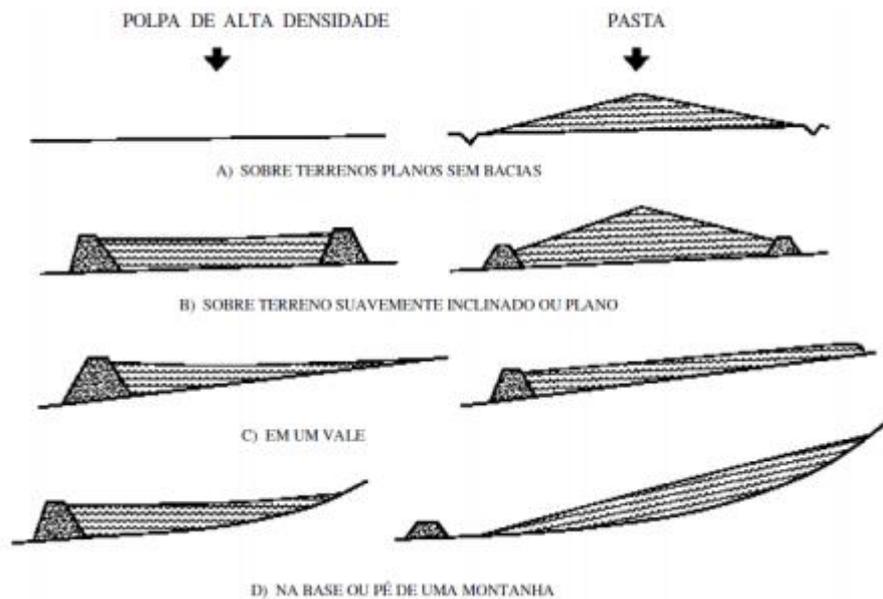


Figura 9 Croquis qualitativos de disposição de polpas e pasta (Portes, 2013 apud Laudriault, 2002).

Segundo Portes (2013), as principais vantagens obtidas pela disposição de rejeitos espessado, comparados com a técnica convencional de rejeito em polpa são:

- Redução da água armazenada no depósito de disposição de rejeitos, reduzindo custos do sistema de disposição, causando menor impacto ambiental. Ainda em relação ao impacto ambiental deve-se levar em consideração a área impactada, tendo em vista a necessidade de barragens de contenção de água.
- A recirculação de água da planta de espessamento de rejeitos para a planta de processos é possível.
- Redução da área em planta necessária para a disposição de rejeitos, o que reduz o tempo de reabilitação futura desta área.
- Melhores condições de recuperação da área no fechamento. Devido à inclinação obtida em um depósito de rejeitos espessados, a superfície é sujeita ao rápido escoamento e secagem, propiciando a existência da vegetação. Além disso, as operações necessárias para a execução de uma camada de solo superficial e revegetação de toda a área tornam-se mais

fáceis e podem ser realizadas através de técnicas convencionais, dada a boa capacidade de suporte para suportar o tráfego de veículos. A cobertura de solo superficial pode não ser necessária, exceto nos casos onde as características químicas do rejeito inibem o crescimento da vegetação. Adicionalmente, a eficácia dependerá das características do rejeito.

- Possibilidade de uso como material de fundação, assim como é feito para os empilhamentos drenados e barragens alteadas para montante.
- As melhores características de permeabilidade e estabilidade, associadas à menor área ocupada, ocasionam menores riscos, dependendo ainda da qualidade da construção e da gestão dessas estruturas. Mesmo em caso de ruptura, o fluxo seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local. Em contrapartida, se ocorre ruptura da barragem de contenção no caso da disposição na forma convencional, toda a polpa presente no reservatório se liquefaz e, neste estado, é capaz de fluir por quilômetros de distância à jusante. Adicionalmente, salienta-se que o rejeito espessado também pode sofrer liquefação, dependendo de suas características e do tipo de carregamento.

Ainda de acordo com Portes (2013), deve-se considerar a existência de aspectos limitadores e as desvantagens da aplicação da tecnologia de espessamento de rejeitos. Dentre estes aspectos estão:

- A taxa de produção deve ser pertinente com a tecnologia de espessamento de rejeitos adotada.
- A reologia do rejeito deve permitir a aplicação da técnica de espessamento de rejeitos.
- Existência de mão de obra especializada.
- Condições topográficas podem inviabilizar o uso da tecnologia de espessamento de rejeitos frente ao método de disposição convencional.
- Necessidade de um alto nível de tecnologia e infraestrutura locais.
- Aumento do consumo de energia

- Necessidade da construção de uma barragem para reservar a água extraída dos rejeitos e para coleta da água da chuva e sedimentos, que deve estar localizada a jusante do depósito de rejeitos.
- Eventual necessidade de reservar a água de processo, mediante adoção de novas estruturas de contenção, tais como barragens.
- Custos elevados associados à infraestrutura.

Melhores condições de disposição em topografias planas, principalmente em ambientes de intensa pluviometria.

4.6 Disposição de Rejeito Filtrado

Segundo Guimarães (2011), a filtração pode ser definida como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que atravessa o meio filtrante é denominado filtrado e os sólidos retidos constituem a torta.

Guimarães (2011) afirma que, para que ocorra a filtração, é necessária a ação de uma força incidente sobre as partículas, que pode ser obtida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação.

De acordo com Guimarães (2011), na filtração a vácuo, é criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante, enquanto que, na filtração sob pressão, uma pressão positiva é aplicada na polpa. Existem processos de filtração em que se combina vácuo e pressão (filtração hiperbárica) e outros que se beneficiam da ação dos capilares de meios cerâmicos porosos combinados com a de aplicação de vácuo (filtração capilar)

Segundo Guimarães (2011), é comum classificar os filtros a vácuo de acordo com a posição relativa da polpa alimentada, em filtros com alimentação por cima (caso do filtro horizontal de correia) ou alimentação por baixo (caso do filtro de disco convencional). A figura 10 apresenta o ciclo de filtração de um filtro de disco convencional.

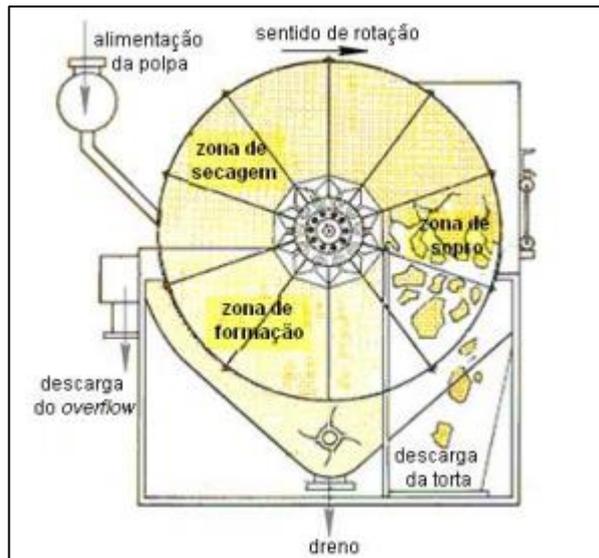


Figura 10 Ciclo de filtragem de um filtro de disco convencional (EIMCO apud Guimarães, 2011 Modificado).

De acordo com Guimarães (2011), na disposição de rejeitos após filtragem (na forma de tortas) é necessário o uso de caminhões ou transportadores de correia para o seu transporte e empilhamento e possivelmente de tratores para espalhá-los. A figura 11 ilustra o processo de disposição de tortas por correia transportadora.



Figura 11 Disposição de rejeitos filtrado em Mantos Blancos (Guimarães, 2011).

Segundo Guimarães (2011), as vantagens destacadas nesse método são as mesmas atribuídas para os rejeitos espessados, porém com melhores resultados devido à maior eficiência de desaguamento, porém, deve-se levar em conta a quantidade de lama presente.

Capítulo 5 CONCLUSÃO

Das alternativas apresentadas, o aterro hidráulico com alteamento a montante aparenta ser a pior opção. O baixo nível de segurança da estrutura causado por diversos fatores diferentes pode colocar em risco todo o ambiente a jusante da barragem, porém, o baixo custo com os alteamentos não deixa de ser um atrativo para as empresas. Sendo assim, dentre os métodos de aterro hidráulico, o método da linha de centro apresenta ser uma boa alternativa para mineradoras que presam pela segurança e não tem condições de fazer uma estrutura de custo mais elevado como as barragens de alteamento a jusante.

Os métodos de disposição em cava a céu aberto e cava subterrânea são métodos bem interessantes em certos casos. Se a mineradora possuir uma cava a céu aberto exaurida e precise fazer a recuperação da área degradada, a disposição do rejeito para retomar a topografia do local é algo interessante, assim como usar esse material para fazer o preenchimento de aberturas subterrâneas ou piso de trabalho para lavra subterrânea pelo método de corte e enchimento. Algo que também pode ser conciliado a essas alternativas é a codisposição e a disposição compartilhada de rejeito e estéril, reduzindo ainda mais a necessidade de locais para alocar esses resíduos. Apesar desses métodos serem interessantes para esses tipos de caso, deve-se atentar a questão da estabilidade e da toxicidade desses materiais, devendo-se fazer estudos químicos e geotécnicos antes de optar por essas alternativas.

Dentre as alternativas citadas, as de desaguamento podem ser consideradas as melhores para empresas que pretendem reaproveitar a água de seus processos, não ter problemas com a estabilidade dos rejeitos e reduzir espaço com infraestruturas necessárias para contenção tanto de água como de rejeito. Por serem métodos com maior demanda tecnológica, algumas de suas desvantagens como, custos com infraestrutura e transporte de rejeitos, podem ser mitigados com o avanço do tempo e da tecnologia, dando a essas alternativas um futuro potencialmente promissor em relação às outras em qualquer situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, C. B. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2006

Bowker, Lindsay N.; Chambers, David M. **THE RISK, PUBLIC LIABILITY, & ECONOMICS OF TAILINGS STORAGE FACILITY FAILURES**. Maine, USA: 2015.

Chambers, David M.; Higman, Bretwood. **LONG TERM RISKS OF TAILINGS DAM FAILURE**. Seldovia, USA: 2011.

De Lara, Ana Flávia M. **ESPESSAMENTO E TRANSPORTE DE PASTA MINERAL**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2011.

De Souza, Mariana M. **ESTUDO PARA O PROJETO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE ALTO IRANI, SC**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2013.

Figueiredo, Marcelo Marques. **ESTUDO DE METODOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS PARA A MINERAÇÃO CASA DE PEDRA – CONGONHAS/MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG: 2007.

França, S.C.A. e Casqueira, R G. **ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO**. Tratamento de Minérios, CETEM/MCT, Rio de Janeiro: 2007.

Guimarães, Nilton C. **FILTRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO A SUA DISPOSIÇÃO EM PILHAS**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2011.

Lozano, Fernando A. E. **SELEÇÃO DE LOCAIS PARA BARRAGENS DE REJEITO USANDO O MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2006.

Luz, A. B. Da; Lins, F. A. F. **INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS – CAPÍTULO 1**. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. Edição do Livro de Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: 2004.

Martin, T. E.; Davies, M. P.; Rice, S.; Higgs, T.; Lightall, P. C. **STEWARDSHIP OF TAILINGS FACILITIES**. AMEC Earth & Environmental Limited/AMEC Simons Ltd., Vancouver :2002.

MPGEO, (2016). **MPF APRESENTA AO DNPM NOVAS RECOMENDAÇÕES SOBRE PLANEJAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO NA MINERAÇÃO**. Disponível em: <<https://www.mpgeo.com.br/single-post/2016/07/27/MPF-APRESENTA-AO-DNPM-NOVAS-RECOMENDA%C3%87%C3%95ES-SOBRE-PLANEJAMENTO-DE-BARRAGENS-DE-REJEITO-NA-MINERA%C3%87%C3%83O>>. Acesso em: 09 fev. 2017.

Portes, Andréa M. C. **AVALIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO NAS CONSISTÊNCIAS POLPA E TORTA**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2013.

Silva, João Paulo Souza. **IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA MINERAÇÃO**. Revista Espaço da Sophia - Nº 08 – novembro/2007 – ANO I

Silva, Raika K. A. **CO-DISPOSIÇÃO E DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA DE REJEITOS E ESTÉREIS EM CAVA EXAURIDA**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto: 2014.

Viana, João Paulo; Da Silva Ana Paula M.; Cavalcante, André Luís B. **DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS NÃO ENERGÉTICAS**. Relatório de pesquisa, IPEA, Brasília: 2012.